

Asociación Argentina de Astronomía
BAAA, Vol. 55, 2012
A.C. Rovero, G.E. Romero, L. Pelliza & M. Lares, eds.

TRABAJO INVITADO

Formación estelar en las Nubes de Magallanes

A.E. Piatti

Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE-CONICET)

Abstract. We present a review about our knowledge on the stellar formation and chemical evolution in the Magellanic Clouds, in the light of the most recent theoretical and observational findings, and of the enigmas that still need to be clarified as well. Particularly, we show how our knowledge has been changing about the existence of spatial metallicity gradients in both clusters and star field populations of the Magellanic Clouds. We present results obtained from a Washington photometric database of nearly 9 million stars. Finally, we analyze the age-metallicity relationship and the star formation history in the Magellanic Clouds and propose new research issues related to this astrophysical field that can be taken advantage by the whole scientific community.

Resumen. Presentamos una revisión de nuestro conocimiento acerca de la formación estelar y evolución química en las Nubes de Magallanes, a la luz de los más recientes hallazgos teóricos y observacionales, como así también de las mas enigmáticas cuestiones que aún restan dilucidar. En particular, mostramos cómo ha ido evolucionando nuestro conocimiento acerca de la existencia de gradientes de metalicidad tanto en la población de cúmulos estelares como entre las estrellas del campo en ambas galaxias. Presentamos resultados que hemos obtenido a partir de una base de datos fotométricos en el sistema de Washington de casi 9 millones de estrellas medidas en las dos Nubes de Magallanes. Finalmente, analizamos las relaciones edad-metalicidad y las historias de formación estelar en las Nubes de Magallanes y proponemos nuevos temas de investigación relacionados a este campo de la astrofísica para que puedan ser aprovechados por toda la comunidad científica.

1. Introducción

Las Nubes de Magallanes son dos galaxias enanas que pertenecen al Grupo Local. Su proximidad a la Vía Láctea, conjuntamente con el advenimiento de nuevos telescopios e instrumentos de última generación, han permitido abordar estudios muy diversos acerca de su formación y evoluciones dinámicas y químicas. Mas aún, ambas galaxias han servido como banco de prueba para confrontar nuestro conocimiento acerca de la historia de formación estelar y el enriquecimiento en elementos pesados en otras galaxias, y de las interacciones entre ellas.

Desde el punto de vista dinámico, estudios recientes muestran que ambas Nubes de Magallanes han tenido un pasado en el cual se ha manifestado una mu-

tua interacción. Así, por ejemplo, Diaz & Bekki (2011) desarrollaron un modelo teórico de la dinámica de ambas Nubes el cual predice que ellas habrían experimentado pasajes cercanos hace unos 1100 y 200 millones de años (ver Fig. 1). Asimismo, uno de sus resultados más sorprendentes revela que las diferentes estructuras del sistema Magallánico -el puente entre ambas Nubes, la corriente Magallánica, el *Leading Arm* -, mostradas a partir de la distribución de H, resultan muy similares a las obtenidas por dichos autores.

Desde el punto de vista de sus evoluciones químicas, diferentes modelos se han desarrollado desde hace varios años contemplando tanto escenarios evolutivos de tipo cerrado, como aquéllos con eventos puntuales de formación intensiva (*bursts*). Estos últimos procesos de formación generan un aumento en el enriquecimiento metálico de las galaxias, por lo que sus relaciones edad-metalicidad experimentan saltos más o menos pronunciados en intervalos de edad relativamente cortos (Pagel & Tautvaisiené 1998; Da Costa & Hatzidimitriou 1998).

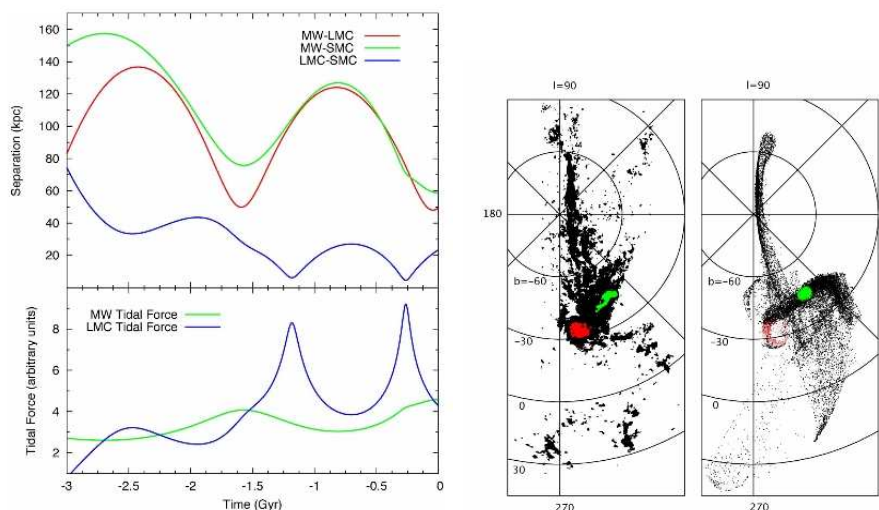


Figura 1. *Izquierda:* Separaciones entre La Vía Láctea y las Nubes de Magallanes como resultado de sus movimientos orbitales. *Derecha:* La distribución de H observada (panel izquierdo) podría ser el resultado de la interacción entre ambas Nubes de Magallanes. Las figuras fueron tomadas del trabajo de Diaz & Bekki (2011).

2. La Nube Menor de Magallanes

Harris & Zaritsky (2004) estudiaron la historia de formación estelar de la Nube Menor de Magallanes sobre la base de uno de los relevamientos fotométricos más abarcativos espacialmente. Los diagramas color-magnitud obtenidos en el sistema *UBVI* para cientos de miles de estrellas en diferentes regiones de la galaxia fueron reproducidos a través de diagramas sintéticos, los cuales les permitieron conocer las distribuciones de edad, metalicidad, enojecimiento y distancia de las poblaciones estelares observadas. Los principales resultados de Harris

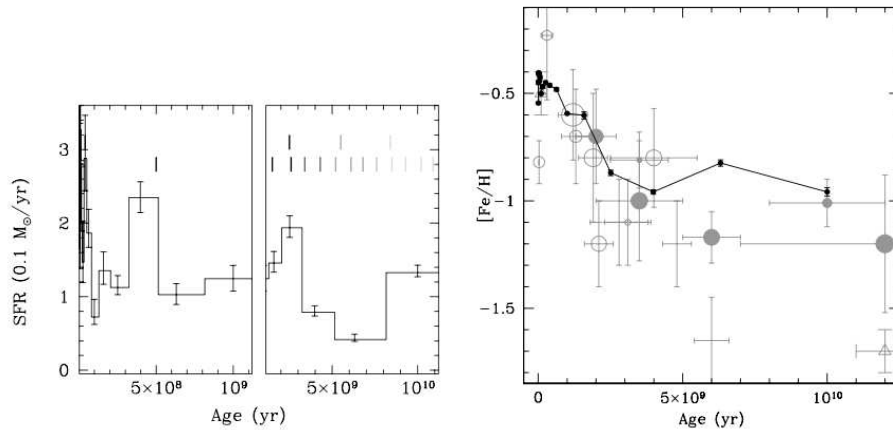


Figura 2. *Izquierda:* Taza de formación estelar en la Nube Menor de Magallanes *Derecha:* Relación edad-metalicidad; los puntos grises corresponden a cúmulos estelares. Las figuras fueron tomadas del trabajo de Harris & Zaritsky (2004).

& Zaritsky muestran que la Nube Menor de Magallanes experimentó un período de escasa o nula formación estelar luego de que ella habría sido formada y, más recientemente, hace unos 2 mil millones de años, sufrió un proceso de formación violento (ver Fig. 2). Por otro lado, la relación edad-metalicidad para los cúmulos estelares y para las estrellas del campo resultaron muy similares. Si bien sus resultados presentan diferencias claras respecto de los modelos de Da Costa & Hatzidimitriou 1998, Pagel & Tautvaisiené 1998, y Diaz & Bekki, 2011, existe también un acuerdo general, en el sentido de que la evidencia observacional confirma que existieron procesos de formación violento en la Nube Menor de Magallanes.

Con la intención de ganar en profundidad y observar las estrellas de Secuencia Principal más viejas de la galaxia Noël et al. (2007) hicieron uso de datos fotométricos *BR* para reconstruir la historia de la formación estelar en 12 campos diferentes y de pequeño tamaño ($12' \times 12'$) distribuidos en diferentes regiones de la Nube Menor de Magallanes. Los autores encontraron que las tazas de formación estelar varían de una región a otra, pero que todas comparten una misma relación edad-metalicidad. A resultados similares arribaron Carrera et al. (2008), a partir del estudio espectroscópico de gigantes rojas distribuidas en el campo de la Nube Menor de Magallanes.

Más recientemente, Piatti (2012) llevó a cabo un estudio integral de la relación edad-metalicidad en la galaxia sobre la base de observaciones fotométricas en el sistema de Washington de unas 3.3 millones de estrellas distribuidas en 11 campos de $36' \times 36'$ cada uno. La comparativamente mayor cobertura espacial de estos campos respecto de las regiones estudiadas por Noël et al, y la obtención de edades y metalicidades para cúmulos estelares y estrellas del campo puestos en una escala homogénea, le permitieron componer una imagen global de la relación edad-metalicidad en la galaxia. Sus resultados muestran que los episodios de formación violenta observados, no sólo se traducen en un aumento de la taza de formación estelar alrededor de los 2-3 y 7-8 mil millones de años,

sino también en un incremento repentino en la metalicidad (ver Fig. 4, paneles de abajo). Asimismo, la Nube Menor de Magallanes exhibiría aparentemente -no intrínsecamente- un gradiente en abundancias metálicas, debido a que las estrellas más jóvenes se habrían formado en las regiones más interiores de la galaxia y con contenidos metálicos relativamente altos (cuadrados negros de la Fig. 4, paneles de arriba).

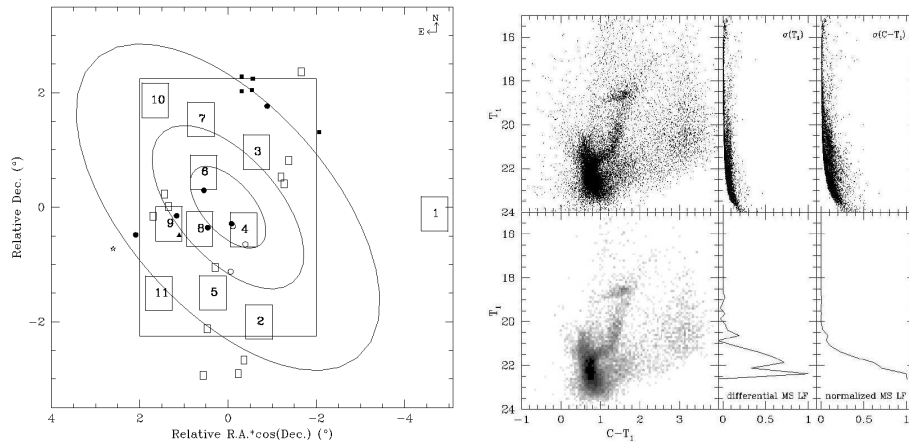


Figura 3. *Izquierda:* Los rectángulos numerados representan las regiones estudiadas por Piatti (2012), mientras que los símbolos llenos y los cuadrados pequeños corresponden a campos estudiados previamente por diferentes autores. *Derecha:* Diagrama color-magnitud obtenido para una subregion de 9'x 9'(arriba-izquierda); los errores fotométricos correspondientes (arriba-derecha); su diagrama de Hess (abajo-izquierda); y la función de luminosidad para la Secuencia Principal observada. Las figuras fueron tomadas del trabajo de Piatti (2012).

3. La Nube Mayor de Magallanes

Similarmente al estudio realizado en la Nube Menor de Magallanes, Harris & Zaritsky (2009) utilizaron más de 20 millones de estrellas observadas fotométricamente y distribuidas a través de la mayor parte del cuerpo de la Nube Mayor de Magallanes para reconstruir su historia de formación estelar. Los diagramas color-magnitud sintéticos obtenidos para cada región fueron comparados con los obtenidos a partir de las observaciones, a fin de estimar los rangos de edad, metalicidad, enrojecimiento y distancia propios de cada uno de ellos. Las tasas de formación estelar resultantes varían relativamente de región a región, pero la composición de todas ellas conduce a una historia de formación estelar en la cual se observa el predominio de un régimen de procesos de formación violenta a lo largo de la vida de la galaxia (ver Fig. 5, panel izquierdo). Por otra parte, Harris & Zaritsky encuentran que las poblaciones de estrellas del campo y la de los cúmulos estelares comparte una misma relación edad-metalicidad, aunque las incertezas son significativas. Es importante notar que las escalas de edad y abundancia química de ambos conjuntos no es la misma, y que la escasez de

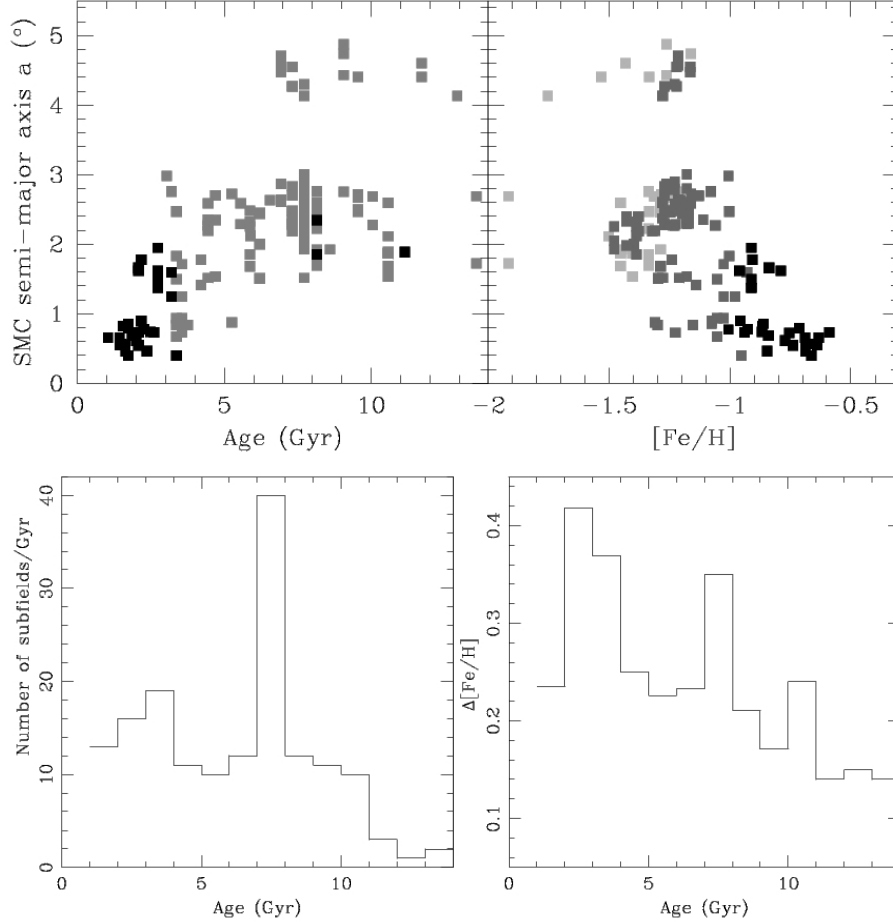


Figura 4. *Arriba:* Gradientes de metalicidad: cada cuadrado corresponde a un campo de $9' \times 9'$; *Abajo:* Número de campos en función de la edad (izquierda) y la variación en la $\Delta [Fe/H]$ de los mismos con la edad (derecha). Las figuras fueron tomadas del trabajo de Piatti (2012).

cúmulos con edades entre 3 y 10 mil millones de años no encuentra su contraparte en las estrellas del campo, ya que se observa actividad de formación estelar en ese período.

Más recientemente, han aparecido los primeros resultados de un nuevo relevamiento llevado a cabo con VISTA, un telescopio de la clase de 4 metros instalado en Cerro Paranal, Chile (Rubele et al. 2011). Se trata de cuatro campos ubicados a unos 3.5 grados del centro de la galaxia que cubren un área total de 5.5 grados cuadrados. Los principales resultados de Rubele et al., en acuerdo con Carrera et al. (2011), confirman que la historia de formación estelar en la Nube Menor de Magallanes depende de la región examinada; esto no ocurre con la relación edad-metalicidad, la cual parece ser en términos globales la misma en cada región.

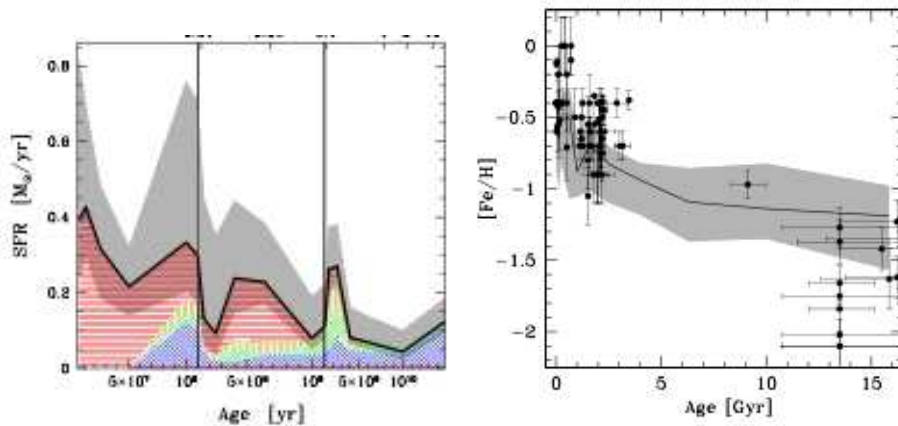


Figura 5. *Izquierda:* Taza de formación estelar en función de la edad; la línea negra corresponde a todo la galaxia y las zonas grises representan las franjas de incerteza; *Derecha:* La línea continua representa la relación edad-metalicidad derivada para las estrellas de la Nube Mayor de Magallanes (en gris su error), en tanto que los círculos negros corresponden a estimaciones de edad y metalicidad de cúmulos estelares. Las figuras fueron tomadas del trabajo de Harris & Zaritsky (2009).

Piatti & Geisler (2012) han extendido los primeros resultados de VISTA a partir de un relevamiento fotométrico en el sistema de Washington de más de 5.5 millones de estrellas distribuidas en 21 campos de $36' \times 36'$ a través del cuerpo principal de la Nube Mayor. La mayor cobertura espacial, y la mayor sensibilidad a la metalicidad para edades mayores a mil millones de años respecto de los filtros $YJKs$ utilizados por VISTA, son algunas de las ventajas comparativas de sus resultados. La Fig. 6 (panel izquierdo) muestra la relación edad-metalicidad obtenida por Piatti & Geisler para 336 subcampos de $9' \times 9'$ representados con triángulos. La escala de grises utilizada en el relleno de los triángulos indica la distancia de un subcampo al centro de la Nube Mayor de Magallanes: mientras más oscuro un triángulo, más alejado del centro de la galaxia se encuentra dicho campo. Los puntos negros representan los valores medios, pesados teniendo en cuenta las incertezas que se pueden introducir al modificar el tamaño y posición de los intervalos utilizados para calcular el promedio, como así también la contribución de los puntos que caen fuera del intervalo de interés debido a sus propios errores. Cuando se compara dicha relación con algunas otras obtenidas previamente a partir de modelos teóricos o de diferentes conjuntos de observaciones (Fig. 6, panel derecho), se encuentra que los resultados de Piatti & Geisler resultan una relación intermedia entre las relaciones de Geha et al. (1998, línea roja) y Harris & Zaritsky (2009, línea anaranjada) y las de Pagel & Tausievené (1998, línea azul), Rubele et al. (2011, línea negra) y Carrera et al. (2011, cuadrados rojos y azules), respectivamente.

La Fig. 7 presenta una comparación de las relaciones edad-metalicidad obtenidas para cúmulos estelares y estrellas del campo, para ambas Nubes de Magallanes. Tanto las edades como las metalicidades han sido obtenidas utilizando las mismas técnicas, por lo que están referidas a una misma escala

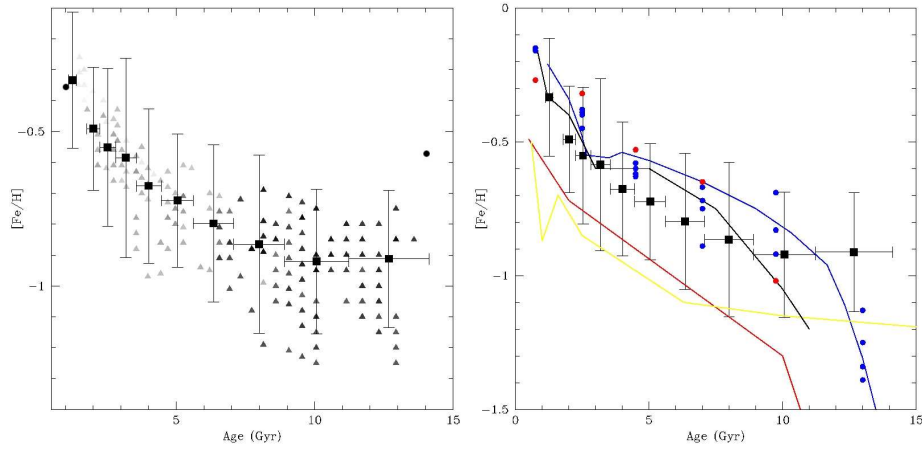


Figura 6. *Izquierda:* Relación edad-metalicidad para el 336 campos de 9'x9' en la Nube Mayor de Magallanes. *Derecha:* La figura fue tomada del trabajo de Piatti & Geisler (2012).

edad/metalicidad. Esta homogeneidad permite comparar diferentes relaciones edad-metalicidad sin necesidad de introducir correcciones o transformación entre escalas de edad/metalicidad diferentes.

Por un lado, la Fig. 7 muestra que las relaciones edad-metalicidad de cúmulos y estrellas del campo en la Nube Menor de Magallanes siguen una tendencia parecida, aunque para edades mayores a los 10 mil millones de años sólo se observan estrellas de campo. El cúmulo más viejo identificado en la Nube Menor de Magallanes es NGC 121 (edad $\sim 10 \times 10^9$ años). Por otro lado, los cúmulos de la Nube Mayor de Magallanes también parecen compartir una relación edad-metalicidad similar a la del campo, pero sólo para edades menores a 3 mil millones de años. Para edades mayores y hasta unos 12 mil millones de años, sólo hay un cúmulo identificado (ES121-SC09), en tanto que abundan estrellas del campo formadas en ese intervalo de edad. Finalmente, los cúmulos más viejos de la Nube Mayor de Magallanes resultan más pobres en metales que sus contemporáneas estrellas del campo. Este resultado plantea el siguiente interrogante: ¿cuál es el origen de los cúmulos viejos observados en la Nube Mayor de Magallanes? Si dichos cúmulos se formaron en la misma galaxia, sería esperable que en promedio las estrellas del campo tuvieran metalicidades similares, ya que ambas poblaciones se habrían formado a partir del mismo gas del cual se formó la galaxia. Si los cúmulos no se formaron en su galaxia huésped, habría que pensar en un escenario de captura. Cúmulos de la Nube Menor de Magallanes podrían haber sido arrancados por la Nube Mayor de Magallanes, pero en ese caso ¿cómo se explicaría que no haya cúmulos con edades similares en la Nube Menor?. Finalmente, la diferencia de metalicidad de $|\Delta([Fe/H])| \sim 0.4$ entre las relaciones edad-metalicidad de ambas galaxias es el resultado de sus diferencias de masas.

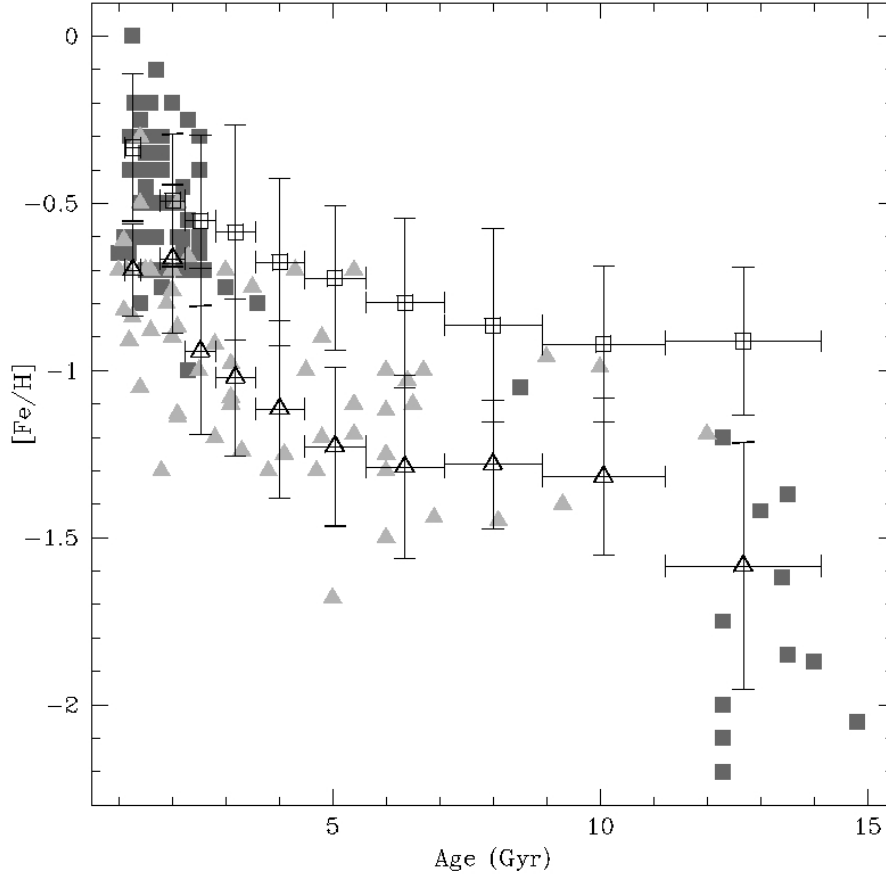


Figura 7. Edades y metalicidades para cúmulos estelares en la Nube Mayor (cuadrados llenos) y en la Nube Menor (triángulos llenos) de Magallanes, comparados con los valores medios para sus respectivos campos (iguales símbolos, vacíos). La figura fue tomada del trabajo de Piatti & Geisler (2012).

4. Trabajos futuros

El estudio de la formación y de las evoluciones dinámicas y químicas en las Nubes de Magallanes ha alcanzado un desarrollo insospechado, el cual ha abierto nuevos horizontes para futuros estudios. Para una mejor comprensión de las historias de formación estelar de cada galaxia, es necesario ganar en profundidad, a fin de observar las estrellas de Secuencia Principal más viejas. Esto requiere de datos observacionales de excepcional calidad, obtenibles con el Telescopio Espacial o con telescopios en la Tierra de la clase de 8 metros o mayores.

Son muy variadas las cuestiones que aún necesitan ser aclaradas. Por ejemplo, ¿por qué no se observan *bursts* similares en ambas Nubes de Magallanes, si ellos fueron el resultado de su interacción mutua? ¿cuál es el rol que desempeñaría la Vía Láctea?. Por otro lado, han aparecido resultados disímiles respecto de la existencia y magnitud de gradientes espaciales de composición química. En

este sentido, un gran desafío se presenta en el campo del conocimiento de los mecanismos de formación de las galaxias.

En la medida que nuevos datos observacionales de calidad estén disponible públicamente -también será necesario alentar nuevas campañas observacionales-, estaremos en condiciones de obtener una imagen espacial tridimensional de la formación estelar y de la evolución química de las Nubes de Magallanes, será posible determinar metalicidades de cúmulos viejos con la precisión proveniente de la espectroscopía de alta dispersión y será posible también completar el estudio de los movimientos propios de los sistemas de cúmulos estelares en ambas Nubes de Magallanes.

5. Bibliografía

- Carrera R., Gallart C., Hardy E., Aparicio A., Zinn R., 2008, *AJ*, 135, 836
Carrera R., Gallart C., Aparicio A., Hardy E., 2011, *AJ*, 162, 61
Da Costa G. S., Hatzidimitriou D., 1998, *AJ*, 115, 1934
Diaz J., Bekki K., 2011, *MNRAS*, 413, 2015
Geha M.C. et al. 1998, *AJ*, 115, 1045
Harris J., Zaritsky D., 2004, *AJ*, 127, 1531
Harris J., Zaritsky D., 2009, *AJ*, 138, 1243
Noel N. E. D., Aparicio A., Gallart C., Hidalgo S. L., Costa E., Méndez R. A., 2009, *ApJ*, 705, 1260
Pagel B.E.J., Tautvaisiené G., 1998, *MNRAS*, 299, 535
Piatti A.E., 2012, *MNRAS*, 422, 1109
Piatti A.E., Geisler D., 2012, *AJ*, en prensa
Rubele S., Kerber L., Girardi L., et al., 2011, *A&A*, 537, 106